

Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich

Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI

ENSI 33/075

Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich

Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2

April 2010

Impressum

Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich

Herausgeber

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Industriestrasse 19

CH-5200 Brugg

Telefon +41(0)56 460 84 00

Zu beziehen bei

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Informationsdienst

Industriestrasse 19

CH-5200 Brugg

oder per E-Mail

Info@ensi.ch

Abrufbar unter

www.ensi.ch

© ENSI, April 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Vorgaben des SGT zur provisorischen Sicherheitsanalyse und zum sicherheitstechnischen Vergleich.....	5
2.1	Ziel der provisorischen Sicherheitsanalyse	5
2.2	Umfang der provisorischen Sicherheitsanalyse	5
2.3	Bericht zur Abklärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen	6
2.4	Behördliche Überprüfung der Resultate der provisorischen Sicherheitsanalyse	6
3	Schlüsselaussagen der provisorischen Sicherheitsanalyse.....	8
4	Erforderliche Analysen und Daten für die provisorische Sicherheitsanalyse	10
4.1	Charakterisierung der Wirt- und Rahmengesteine	10
4.2	Hydrogeologie und Mechanismen der Radionuklidausbreitung	10
4.3	Geochemische Bedingungen	10
4.4	Langzeitentwicklung (Geodynamik)	10
4.5	Biosphäre und Expositionswege	10
5	Vergleich von Standorten in Etappe 2 des SGT.....	11
5.1	Standardisiertes Parametervariationsverfahren	12
5.2	Sicherheitstechnischer Vergleich anhand der Resultate des standardisierten Parametervariationsverfahrens	14
5.3	Beispielhafte Anwendung des standardisierten Parametervariationsverfahrens	17
6	Dokumentation der provisorischen Sicherheitsanalysen und des sicherheitstechnischen Vergleichs in Etappe 2 des SGT	18
7	Begriffsbestimmungen.....	20

1 Einleitung

Mit dem Konzeptteil Sachplan geologische Tiefenlager (SGT¹), welcher vom Bundesrat am 2. April 2008 verabschiedet wurde, werden die Ziele, das Vorgehen und die sicherheitstechnischen Kriterien sowie ihre Anwendung für das Standortauswahlverfahren geologischer Tiefenlager festgelegt. Das Auswahlverfahren erfolgt stufenweise und gliedert sich in drei Etappen:

Etappe 1: Auswahl von geologischen Standortgebieten je für ein HAA- und SMA-Lager

Die Entsorgungspflichtigen evaluieren gemäss aktuellem Stand der geologischen Kenntnisse und aufgrund der im SGT definierten Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit mögliche geologische Standortgebiete, schlagen geologische Standortgebiete vor und begründen diese in einem Bericht zuhanden des Bundesamts für Energie (BFE). Die vorgelegte Auswahl wird von den Behörden überprüft und bei positiver Beurteilung vom Bundesrat genehmigt und in den Sachplan als *Vororientierung* aufgenommen.

Etappe 2: Auswahl von mindestens zwei Standorten je für HAA- und SMA-Lager

In Etappe 2 werden von den Entsorgungspflichtigen ausgehend von den in der Etappe 1 vorgeschlagenen und genehmigten geologischen Standortgebieten unter Berücksichtigung von Sicherheit und technischer Machbarkeit sowie raumplanerischen und sozioökonomischen Aspekten potenzielle Standorte identifiziert. Dabei hat die Sicherheit höchste Priorität. Die Entsorgungspflichtigen ergänzen dazu die in Etappe 1 vorgenommene kriterienbezogene Bewertung von Sicherheit und technischer Machbarkeit durch quantitative provisorische Sicherheitsanalysen und führen einen sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte durch. Auf der Basis der Gesamtbewertung (inkl. raumplanerischer und sozio-ökonomischer Aspekte) schlagen die Entsorgungspflichtigen mindestens je zwei Standorte für das HAA- und das SMA-Lager vor. Die Auswahl wird von den Behörden überprüft und bei positiver Beurteilung vom Bundesrat genehmigt und in den Sachplan als *Zwischenergebnis* aufgenommen.

Etappe 3: Standortwahl und Rahmenbewilligungsverfahren für HAA- und SMA-Lager

In der dritten Etappe werden die verbleibenden Standorte in Hinblick auf die Standortwahl und die Einreichung des Rahmenbewilligungsgesuchs vertieft untersucht und die erforderlichen standortspezifischen geologischen Kenntnisse falls nötig mittels erdwissenschaftlichen Untersuchungen vervollständigt. Gestützt auf die Ergebnisse des Auswahlverfahrens (Festlegung) und einer positiven Beurteilung durch die Sicherheitsbehörde wird der Bundesrat über die Erteilung der Rahmenbewilligungen für je einen Lagerstandort für schwach- und mittelaktive (SMA) und hochaktive Abfälle (HAA) oder einen gemeinsamen Standort für alle Abfallkategorien entscheiden.

Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die Etappe 2 und fasst die Vorgaben des SGT zu den in dieser Etappe geforderten provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich zusammen. Er konkretisiert die spezifischen Anforderungen des ENSI an die provisorische Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich. Weiter werden Umfang und Inhalt der für Etappe 2 erforderlichen sicherheitstechnischen Dokumentation dargestellt.

¹ SGT: Sachplan geologische Tiefenlager, Konzeptteil, 2. April 2008, Bundesamt für Energie (BFE)

2 Vorgaben des SGT zur provisorischen Sicherheitsanalyse und zum sicherheitstechnischen Vergleich

2.1 Ziel der provisorischen Sicherheitsanalyse

Die in Etappe 2 geforderte provisorische Sicherheitsanalyse hat zum Ziel, über die Wirkung und das Verhalten der einzelnen Barrieren nach ordnungsgemäsem Verschluss des geologischen Tiefenlagers Auskunft zu geben und zu zeigen, ob die berechneten Dosen unterhalb des Dosis-Schutzkriteriums der Richtlinie ENSI-G03 liegen. Numerische Berechnungen sind Teil der provisorischen Sicherheitsanalyse für den jeweiligen Standort. Die Ergebnisse dienen dem sicherheitstechnischen Vergleich von Standorten und geben Hinweise auf den Umfang der notwendigen weiteren Untersuchungen in Etappe 3, um eine ausreichende Datengrundlage für ein Rahmenbewilligungsgesuch zu erreichen (SGT, S. 69).

2.2 Umfang der provisorischen Sicherheitsanalyse

Die provisorische Sicherheitsanalyse muss aufgrund des Lagerkonzepts unter Berücksichtigung des definierten Abfallinventars und aufgrund der verfügbaren technischen und wissenschaftlichen Daten insbesondere Auskunft geben über (SGT, S. 69):

- das Rückhaltevermögen des Gesamtsystems (technische und geologische Barrieren und ihre Wechselwirkungen);
- die maximale Dosis aus den realistisch zu erwartenden Freisetzungen (Referenzszenarium mit zugehörigem Referenzfall);
- den Beitrag der geologischen Barriere zur Langzeitsicherheit;
- das Langzeitverhalten der Barrieren.

In die sicherheitstechnische Bewertung sind zusätzlich Aspekte des Systemverhaltens und der Robustheit einzubeziehen. Darunter ist folgendes zu verstehen:

- Verlässlichkeit der räumlichen und zeitlichen Prognose (Explorierbarkeit, Prognostizierbarkeit, Zuverlässigkeit der Daten, SGT, S. 69/70);
- Variabilität bzw. Ungewissheiten der in den Modellierungen verwendeten Prozesse und Parameter und ihr Einfluss auf die Dosisberechnungen;
- Sensitivität der errechneten Dosis auf ein von den Erwartungen abweichendes Systemverhalten.

In der provisorischen Sicherheitsanalyse wird die mögliche Freisetzung von Radionukliden (Migration der Nuklide vom Lager bis in die Biosphäre) quantitativ bestimmt. Der Analyse werden ein definiertes Abfallinventar sowie begründete Annahmen und Erwartungswerte zu den Eigenschaften der vorgesehenen technischen und geologischen Barrieren zugrunde gelegt. Unter Berücksichtigung der Wasserfließwege in der Biosphäre sowie der möglichen Aufnahme der Radionuklide über das Trinkwasser und die Nahrung wird die Dosis für eine Einzelperson berechnet und beurteilt. Als Bewertungsmaßstab für die Sicherheit gilt für Etappe 2 das in ENSI-G03 festgelegte Schutzkriterium von 0.1 mSv/Jahr (SGT S. 70).

2.3 Bericht zur Abklärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen

Für die provisorischen Sicherheitsanalysen müssen die Entsorgungspflichtigen die Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen frühzeitig mit dem ENSI abklären. Die Kenntnisse über die Standorte müssen die Durchführung einer provisorischen Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich erlauben; gegebenenfalls sind sie durch Untersuchungen zu ergänzen. Die verwendeten geologischen Daten müssen die aktuelle Situation am Standort für die provisorische Sicherheitsanalyse adäquat² wiedergeben und die vorhandenen relevanten Ungewissheiten berücksichtigen (SGT, S. 45).

Um die Frage zusätzlicher Untersuchungen (beispielsweise Sondierbohrungen in den Standortregionen) transparent zu klären, erstellen die Entsorgungspflichtigen nach Abschluss der behördlichen sicherheitstechnischen Überprüfungen in Etappe 1 einen Bericht, in dem sie für jedes Standortgebiet darlegen, ob der aktuelle Wissensstand für die Durchführung der erforderlichen provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 ausreichend ist. In diesem Bericht soll gezeigt werden, welche Prozesse und Parameter für die provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 Relevanz haben. Zudem soll der Bericht aufzeigen, was der jeweilige Kenntnisstand der Prozesse und Parameter ist. Im Bericht sollen die unterschiedlichen Annahmen, die wegen des unterschiedlichen Kenntnisstandes angewendet werden müssen, ausgewiesen und beim Entscheid über die Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen berücksichtigt werden.

Sollte der Wissensstand den Anforderungen nicht genügen, schlagen die Entsorgungspflichtigen die erforderlichen ergänzenden Untersuchungen vor.

Das ENSI prüft diesen Bericht und hält in einer Stellungnahme zuhanden der Entsorgungspflichtigen fest, ob in Etappe 2 zusätzlich zu den von den Entsorgungspflichtigen vorgeschlagenen Untersuchungen noch weitere Untersuchungen durchzuführen sind.

2.4 Behördliche Überprüfung der Resultate der provisorischen Sicherheitsanalyse

Das ENSI prüft die Vorschläge der Entsorgungspflichtigen für mögliche Standorte aus Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit. Die Resultate der provisorischen Sicherheitsanalysen für jeden Standort werden anhand der Sicherheitsanforderungen der Richtlinie ENSI-G03 und der Anhänge I und III SGT³ bewertet. Das ENSI prüft auch für jeden Standort, ob die vorhandenen Kenntnisse unter Berücksichtigung der Ungewissheiten die Durchführung einer provisorischen Sicherheitsanalyse erlauben. Die verwendeten geologischen Daten (z.B. Wirtgesteinsausdehnung, hydraulische Durchlässigkeit, erwartete hydraulische Gradienten, geochemische Bedingungen) müssen die Situation am Standort adäquat wiedergeben und die vorhandenen Ungewissheiten berücksichtigen.

Beurteilt werden auch die felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen für Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss des geologischen Tiefenlagers (u.a. Gesteins- und Gebirgsfestigkeiten, Verformungseigenschaften der Gesteine, Tiefenlage und Gebirgsspannungen, Stabilität der Hohlräume, natürliche Gasführung). Das ENSI stellt insbesondere fest, ob die Wahl der Standorte aus sicherheitstechnischer Sicht gerechtfertigt ist.

² Adäquat bedeutet, dass der von den Entsorgungspflichtigen dokumentierte Kenntnisstand ausreicht, um zu zeigen, dass die Aussagen zur Langzeitsicherheit des Tiefenlagers belastbar sind.

³ Anhang I enthält die Beschreibung und Anwendung der Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit. Anhang III erläutert die stufenweise Vertiefung der Sicherheitsbetrachtungen von der Etappe 1 zur Etappe 3.

Die Überprüfung des ENSI hat u.a. folgende Fragen zu beantworten (SGT, S. 64):

- Haben die Entsorgungspflichtigen die Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit gemäss Konzeptteil des Sachplans (Tabelle 1) bei der Erarbeitung der Vorschläge adäquat und stufengerecht berücksichtigt?
- Ist das Vorgehen der Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung der Vorschläge transparent und nachvollziehbar?
- Haben die Entsorgungspflichtigen alle verfügbaren relevanten geologischen Informationen berücksichtigt und sind diese ausreichend für die Zwecke einer provisorischen Sicherheitsanalyse im Hinblick auf das Zwischenergebnis in Etappe 2 SGT?
- Kann das ENSI die Resultate der provisorischen Sicherheitsanalysen nachvollziehen?
- Kann das ENSI die Resultate der Abwägungen aufgrund der qualitativen Sicherheitskriterien nachvollziehen und dem Resultat der gesamtheitlichen Bewertung zustimmen?
- Kann das ENSI den Standortvorschlägen aus der Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit zustimmen?

Tabelle 1: Kriterien zur Standortevaluation zu Sicherheit und technischer Machbarkeit (SGT, S. 40)

Kriteriengruppe	Kriterien
1 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2 Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4 Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung

Das Ergebnis der Überprüfung hält das ENSI in einem Gutachten fest (SGT, S. 46).

Die Ergebnisse der quantitativen provisorischen Sicherheitsanalysen für alle Standorte – zusammen mit der qualitativen Bewertung der Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit (Tabelle 1) und der zu beurteilenden Aspekte unter Berücksichtigung der für die Umsetzung relevanten Indikatoren gemäss Konzeptteil des Sachplans (Tabelle A1-14, SGT) – führen durch eine Gesamtbewertung zum Vorschlag von mindestens zwei Standorten je für das HAA-Lager und das SMA-Lager (SGT, S. 63).

In Etappe 3 SGT werden die provisorischen Sicherheitsanalysen im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsverfahren vertieft und mit einer umfassenden Szenarien- und Risikoanalyse ergänzt (SGT, S. 73).

3 Schlüsselaussagen der provisorischen Sicherheitsanalyse

Die provisorische Sicherheitsanalyse hat Aussagen zu folgenden Aspekten zu enthalten:

- *Barrierenwirkung und deren Langzeitentwicklung:* Die Entsorgungspflichtigen haben die Barrierenwirkung des Mehrfachbarrierensystems insgesamt und die jeweiligen Beiträge der technischen und natürlichen Barrieren⁴ zu bestimmen. Das Langzeitverhalten der Barrieren ist aufzuzeigen. Die Entsorgungspflichtigen haben die sicherheitstechnische Bedeutung lagerbedingter Einflüsse zu bewerten, insbesondere die Wechselwirkungen zwischen den Barrieren und lagerinduzierten Prozessen (bspw. Temperaturentwicklung, Gasbildung bzw. Gasdruckaufbau, Hoch-pH-Fahne).
- *Erfüllung des Schutzkriteriums nach ENSI-G03:* Die Entsorgungspflichtigen führen eine numerische Analyse der erwarteten Entwicklung des Tiefenlagers durch und zeigen, ob das Schutzkriterium von 0.1 mSv/Jahr eingehalten wird. Dazu definieren sie ein Referenzszenarium und einen dazugehörigen Referenzfall. Der Referenzfall soll der realistischerweise anzunehmenden Entwicklung entsprechen. Mit zusätzlichen Rechenfällen werden alternative Entwicklungsmöglichkeiten evaluiert. Die verwendeten Daten müssen die Situation am Standort für die provisorische Sicherheitsanalyse adäquat wiedergeben.
- *Vergleich von Standorten:* Die provisorische Sicherheitsanalyse enthält alle Berechnungen, die gemäss den Vorgaben SGT, Anhang III und des ENSI für den Vergleich der Standorte mittels der standardisierten Vergleichsmethode benötigt werden. Darunter fällt das Aufzeigen des jeweiligen charakteristischen Dosisintervalls. Die Vorgaben des ENSI für die notwendigen Berechnungen zur Durchführung der standardisierten Vergleichsmethode werden in Kap. 5 näher erläutert.
- *Hinweise auf allfällige Feldarbeiten:* Die Bewertung eines Standorts in der provisorischen Sicherheitsanalyse und die qualitative Bewertung der Kriterien gemäss Tabelle 1 für den sicherheitstechnischen Vergleich geben auch Hinweise auf allfällige Feldarbeiten für die Etappe 3 SGT.

Die Dokumentation der provisorischen Sicherheitsanalyse enthält ausserdem Angaben bezüglich:

- *Lage, Geometrie und Eigenschaften des Wirtgesteins:* Dies beinhaltet belastbare Aussagen zur Tiefenlage des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, zur Mächtigkeit dieser Gesteinsschichten und zu regionalen Strukturen, sowie zu den Eigenschaften und Annahmen zu den Zustandsparametern des Wirtgesteins.

⁴ Beispielsweise das Aufzeigen der Rückhalteigenschaften der Einzelbarriere Wirtgestein für Radionuklide.

- *Einfluss der bautechnischen Auslegung auf die Sicherheit:* Die provisorischen Sicherheitsanalysen sollen auch explizit definierte bautechnische Annahmen berücksichtigen, da diese direkt mit der Langzeitsicherheit verknüpft sind. Ungenügende Stützmittel gefährden die Betriebssicherheit und führen zu einer Schwächung der geologischen Barriere. Die Entsorgungspflichtigen definieren bzgl. bautechnischer Machbarkeit Ausschluss- und Eignungskriterien für die Anordnung von Zugangsbauwerken und Lagerbereichen.
Die bautechnische Machbarkeit ist unter Berücksichtigung der lokalen Gebirgseigenschaften (Trennflächen, Spannungen), den Anforderungen an das Mehrfachbarrierensystem sowie den Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinsichtlich der maximalen Tiefenlage (Bautechnik) aufzuzeigen.
- *Biosphäre:* Die Entsorgungspflichtigen legen die regionale hydrogeologische Situation dar, zeigen das *Spektrum* typischer Exfiltrationssituationen auf und beschreiben die konzeptuellen Modelle der Radionuklid Ausbreitung in der Biosphäre (Morphologie, Klima), inklusive ihrer Parametrisierung.

Die Dokumentation der provisorischen Sicherheitsanalysen muss folgende weitere Aspekte berücksichtigen:

- *Nachvollziehbarkeit:* Die Entsorgungspflichtigen haben für die provisorische Sicherheitsanalyse die Quellen der verwendeten Eingabewerte transparent zu belegen. Sie haben zu zeigen, ob die Werte aus Bohrungen, Laborexperimenten, Plausibilitätsüberlegungen oder Analogieschlüssen abgeleitet wurden und ob sie auf das betrachtete Tiefenlager übertragbar sind. Abschätzungen von Zustandsparametern (beispielsweise Drücke oder Gradienten) sind zu erläutern. Die in der provisorischen Sicherheitsanalyse verwendeten Modelle (einschliesslich Eingabewerte, Rand- und Anfangsbedingungen) und die erhaltenen Resultate sind zu dokumentieren.
- *Ungewissheiten:* Die Entsorgungspflichtigen analysieren die Robustheit des Tiefenlagers und seines geologischen Umfelds durch die Bestimmung des Einflusses von Ungewissheiten und Variabilitäten auf die daraus resultierenden radiologischen Konsequenzen. Die daraus gezogenen Schlüsse für die Langzeitsicherheit sind darzulegen. Die Entsorgungspflichtigen erstellen Berechnungen zum Systemverhalten unter anderen Voraussetzungen innerhalb des Referenzszenariums und analysieren die Sensitivität für ein abweichendes Systemverhalten (technische Barrieren, Geosphäre). Wo Ungewissheiten bestehen, sind in der provisorischen Sicherheitsanalyse die maximalen radiologischen Konsequenzen durch die Berechnung umhüllender Varianten oder durch konservative Annahmen abzuschätzen.
- *Verlässlichkeit der Aussagen:* Die Entsorgungspflichtigen machen qualitative Aussagen zur Verlässlichkeit der Explorierbarkeit und zur zeitlichen Entwicklung des geologischen Tiefenlagers und seines geologischen Umfelds. Sie machen eine qualitative Bewertung der Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit gemäss Tabelle 1.

4 Erforderliche Analysen und Daten für die provisorische Sicherheitsanalyse

4.1 Charakterisierung der Wirt- und Rahmengesteine

Die Entsorgungspflichtigen haben die in der provisorischen Sicherheitsanalyse verwendeten Informationen und Daten durch Kenntnisse aus dem geologischen Standortgebiet zu belegen. Ist dies nicht vollständig möglich, haben sie aufzuzeigen, dass die Übertragung von Informationen aus einem gleichen oder sicherheitstechnisch ähnlichen Wirtgestein an anderen Orten für die provisorische Sicherheitsanalyse belastbar ist.

Die Entsorgungspflichtigen haben zu zeigen, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich unter Berücksichtigung der vorhandenen Ungewissheiten bei der Bestimmung der Tiefenlage genügend tief liegt, damit die standortspezifischen Auswirkungen betreffend flächenhafter Erosion und Dekompaktion akzeptabel sind.

Für erst später erfassbare auslegungsbestimmende Elemente sind Ausschluss- bzw. Eignungskriterien darzulegen, wie sie im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch gefordert werden.

4.2 Hydrogeologie und Mechanismen der Radionuklidenausbreitung

Die Entsorgungspflichtigen haben für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalyse die hydrogeologischen Verhältnisse standortspezifisch zu beschreiben. Falls keine genügenden Befunde für die Charakterisierung der Transportpfade bzgl. Nuklidtransportprozesse vorliegen, müssen eingrenzende Annahmen verwendet werden. Weiter sind die Exfiltrationsmöglichkeiten anzugeben. Die in Etappe 1 SGT dokumentierten Aussagen zu den Mechanismen der Radionuklidenausbreitung sind standortspezifisch im jeweiligen einschlusswirksamen Gebirgsbereich darzulegen.

4.3 Geochemische Bedingungen

Die Entsorgungspflichtigen haben die in den provisorischen Sicherheitsanalysen verwendeten geochemischen Bedingungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu begründen. Für die Wirtgesteine ist die Ableitung der chemischen Zusammensetzungen der Porenwässer (u.a. *Eh*-Bereich, pH-Wert und Ionenstärke) in den einschlusswirksamen Gesteinsbereichen darzulegen und geochemische Größen wie die Sorptionskoeffizienten und Diffusionskoeffizienten der sicherheitsrelevanten Radionuklide zu bestimmen und zu begründen.

4.4 Langzeitentwicklung (Geodynamik)

Die Entsorgungspflichtigen haben für die provisorischen Sicherheitsanalysen die erwartete regionale und lokale Langzeitentwicklung des Lagerstandorts aufzuzeigen.

4.5 Biosphäre und Expositionspfade

Die im Entsorgungsnachweis (Projekt Opalinuston) verwendete Biosphärenmodellierung ist konzeptuell für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalyse ausreichend. Die Modellierung der Radionuklidenausbreitung in der Biosphäre unter Berücksichtigung der Exposi-

tionspfade soll aber für jedes geologische Standortgebiet spezifisch durchgeführt werden unter Berücksichtigung möglicher typischer Morphologien und Klimasituationen (inkl. Verdünnungspotenziale).

Die Entsorgungspflichtigen haben in der provisorischen Sicherheitsanalyse auch die sicherheitstechnische Bedeutung von alternativen Biosphärenszenarien zu untersuchen, ebenfalls unter Verwendung von plausiblen Annahmen zu möglichen Entwicklungen von Gebietsmorphologie und Klima.

Das ENSI hat die in Etappe 1 von den Entsorgungspflichtigen hergeleiteten Betrachtungszeiträume von 100'000 Jahren (SMA-Lager) und 1'000'000 Jahren (HAA-Lager) als nachvollziehbar beurteilt⁵. Die Entsorgungspflichtigen haben für die provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 die möglichen Veränderungen der Biosphäre innerhalb des Betrachtungszeitraums für das SMA- und das HAA-Lager aufzuzeigen und in den Dosisberechnungen zu berücksichtigen.

5 Vergleich von Standorten in Etappe 2 des SGT

Als Zwischenergebnis in Etappe 2 darf kein Standort vorgeschlagen werden, der aufgrund der provisorischen Sicherheitsanalysen eindeutig als weniger geeignet bewertet wird als die anderen Standorte.

Der SGT fordert für den sicherheitstechnischen Vergleich von potenziellen Standorten ein standardisiertes Vorgehen, das die quantitativen Ergebnisse der einzelnen provisorischen Sicherheitsanalysen berücksichtigt, aber auch den qualitativen Aspekten der Betrachtungen zu Sicherheit und technischer Machbarkeit Rechnung trägt⁶.

Der Vergleich enthält folgende Elemente (vgl. Fig. 4):

- A) Darlegung der quantitativen Ergebnisse der Freisetzungsberechnungen für die realistischerweise zu erwartende Entwicklung des Tiefenlagers (Referenzszenarium, zeitlicher Verlauf der Personendosiskurve)⁷.
- B) Diskussion der Robustheit des Tiefenlagersystems, Angaben zum Variationsbereich und Aufzeigen der Ungewissheiten in den bei der Modellierung verwendeten Parametern und deren Einfluss auf die Personendosiskurve unter Berücksichtigung der Vorgaben zu den durchzuführenden Rechenfällen.
- C) Qualitative Bewertung der Kriterien gemäss Tabelle 1 (z.B. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen, mögliche Beeinträchtigung des Tiefenlagerstandorts durch Erosion). Weitere qualitative Sicherheitsindikatoren (z.B. Verweil- oder Einschlusszeiten natürlicher Tracerstoffe im Porenwasser des Wirtgesteins) sind zu berücksichtigen, soweit vorhanden.

Der sicherheitstechnische Vergleich der Standorte erfolgt zuerst durch die nachfolgend beschriebene Methode (Kap. 5.1), die einen Vergleich der numerischen Berechnungen beinhaltet.

⁵ Die Beurteilung des ENSI zu den vorgeschlagenen Betrachtungszeiträumen ist in ENSI 33/70 (*Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1*) auf den Seiten 53/54 dokumentiert.

⁶ Qualitative Bewertung der Kriterien bzgl. Sicherheit und technischer Machbarkeit.

⁷ Die Entsorgungspflichtigen legen ein Referenzszenarium mit einem Referenzfall pro Standort fest und begründen die Wahl von Referenzparameterwerten für die in die Berechnungen eingehenden Grössen. Darunter fällt beispielsweise die Angabe von Werten für die nuklidspezifischen Diffusionskoeffizienten, Sorptionskoeffizienten und Löslichkeitslimiten.

Dabei werden die erwartete Entwicklung des Gesamtsystems (Nahfeld, Geosphäre) sowie seine Robustheit und die Ungewissheiten und Variabilitäten in den quantitativen Parametern gemäss den Punkten A und B berücksichtigt. Standorte, die sich bei diesem Vergleich als eindeutig weniger geeignet als andere erweisen oder das Dosis-Schutzkriterium nicht erfüllen, scheiden aus (SGT, S. 70).

Die verbleibenden Standorte werden anschliessend anhand der Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit gemäss Tabelle 1 in Punkt C qualitativ bewertet. Unter A) und B) fliessen vor allem Aspekte der Kriteriengruppe 1 „Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“⁸ und der Kriteriengruppe 2 „Langzeitstabilität“⁹ in die quantitativen Berechnungen ein. Unter C) werden auch die unter A) und B) nicht direkt betrachteten Kriteriengruppe 3 „Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen“¹⁰ und Kriteriengruppe 4 „Bautechnische Eignung“¹¹ qualitativ bewertet.

Für die beurteilten Kriterien zu Sicherheit und bautechnischer Machbarkeit ist eine qualitative Bewertungsskala („sehr günstig“, „günstig“, „bedingt günstig“, „ungünstig“) anzuwenden. Der Bewertungsstabsstab wird unter Berücksichtigung der Ergebnisse der provisorischen Sicherheitsanalyse sowie gestützt auf Erfahrungswerte für die betreffende Eigenschaft erläutert.

Für den sicherheitstechnischen Vergleich haben die Entsorgungspflichtigen eine zusammenfassende Gesamtbewertung der Standorte bezüglich der in A), B) und C) erarbeiteten Befunde vorzulegen. Die Gesamtbewertung demonstriert das stufengerechte in Etappe 2 erreichte Verständnis der Langzeitsicherheit des Tiefenlagersystems und berücksichtigt die berechneten Dosen. Die Bewertungsergebnisse werden zu einem Gesamturteil über die Eignung der Standorte zusammengezogen. Die Gesamtbewertung der Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers für den sicherheitstechnischen Vergleich kann weitere Argumente enthalten, welche die Schlussfolgerungen der provisorischen Sicherheitsanalyse zusätzlich stützen können. Das Ergebnis wird auf der entsprechenden qualitativen Werteskala („sehr geeignet“, „geeignet“, „bedingt geeignet“, „weniger geeignet“) dargestellt. Vorgehen und Ergebnis sind im Sicherheitstechnischen Bericht (Fig. 4) zu dokumentieren. Als potenzielle Standorte kommen nur solche in Frage, welche mindestens die Bewertung „geeignet“ erreicht haben. Ein Standort kann ausscheiden, falls bei dieser Bewertung eindeutige Nachteile gegenüber den anderen Standorten festgestellt werden (SGT, S. 71).

5.1 Standardisiertes Parametervariationsverfahren

Da für den Vergleich von Standorten in Etappe 2 SGT noch keine umfassenden standortspezifischen Datensätze vorliegen müssen, wird das standardisierte Parametervariationsverfahren auf die Beurteilung der relevanten Freisetzungs- und Transportprozesse von Radionukliden beschränkt. Das menschliche Eindringen in ein Tiefenlager wird nicht betrachtet¹². Für den Ver-

⁸ Die Kriteriengruppe „Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ umfasst die Kriterien „Räumliche Ausdehnung“, „Hydraulische Barrierenwirkung“, „Geochemische Bedingungen“ und „Freisetzungspfade“.

⁹ Die Kriteriengruppe „Langzeitstabilität“ umfasst die Kriterien „Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften“, „Erosion“, „Lagerbedingte Einflüsse“ und „Nutzungskonflikte“.

¹⁰ Die Kriteriengruppe „Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen“ umfasst die Kriterien „Charakterisierbarkeit der Gesteine“, „Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse“ und „Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen“.

¹¹ Die Kriteriengruppe „Bautechnische Eignung“ umfasst die Kriterien „Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen“ und „Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung“.

¹² Berechnungen für das Projekt Opalinuston zeigen, dass bei menschlichem Eindringen ins Lager Dosen verursacht werden, die mehrere Grössenordnungen über derjenigen des Referenzfalls, aber immer noch unterhalb des behördlichen Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr liegen. Die radiologischen Folgen bei menschlichem Eindringen ins Lager sind nicht primär vom Wirtgestein

gleich ist die Robustheit der Ergebnisse gegenüber ungünstigen Parameterwerten wichtig. In erster Linie sind deshalb Berechnungen mit Annahme eines erhöhten Wasserflusses¹³ in der Geosphäre oder der Annahme einer reduzierten Rückhaltefähigkeit des Wirtgesteins und der Rahmengesteine von Bedeutung.

Aus den technischen Barrieren des Tiefenlagers freigesetzte und im Porenwasser gelöste Nuklide können durch Transportprozesse wie Diffusion oder advektiven Wasserfluss bis in die Biosphäre transportiert werden. Die im Tiefenlagerbereich vorherrschenden chemischen Bedingungen haben einen Einfluss darauf, wie gut sich Nuklide im Porenwasser des umgebenden Materials lösen können. Zusätzlich beeinflussen sie auch die Rückhaltung der Nuklide durch Sorption in der Verfüllung und in den umgebenden Gesteinen.

Der Einfluss von Ungewissheiten in den Prozessen soll durch Variationen bewertet werden. Die Entsorgungspflichtigen begründen die Variationsbereiche für die in die Berechnungen eingehenden Grössen und definieren einen unteren respektive oberen Eckwert. Darunter fällt die Angabe von Werten für den Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich sowie die nuklidspezifischen Diffusionskoeffizienten, Sorptionskoeffizienten und Löslichkeitslimiten.

Für das standardisierte Parametervariationsverfahren sollen deshalb ausgehend vom Referenzfall mindestens folgende Fälle berechnet werden¹⁴:

- a) *Berechnungen mit einem gegenüber dem Referenzfall erhöhten Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (oberer Eckwert).*
- b) *Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall ungünstigen nuklidspezifischen Diffusionskoeffizienten (obere Eckwerte für homogen-poröse Wirtgesteine, untere Eckwerte für geklüftete Wirtgesteine) in der Geosphäre.*
- c) *Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall erhöhten nuklidspezifischen Löslichkeitslimiten (oberer Eckwerte) im Nahfeld.*
- d) *Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall verringerten Sorptionskoeffizienten (untere Eckwerte für K_d) im Nah- und Fernfeld. Falls der K_d -Referenzwert eines Nuklids weniger als $0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$ beträgt, ist in den Berechnungen ein K_d -Wert von $0 \text{ m}^3/\text{kg}$ zu verwenden.*
- e) *Ausgehend vom Referenzfall ist der Einfluss von möglichen alternativen Klimavarianten¹⁵ im Betrachtungszeitraum für das SMA- resp. HAA-Lager aufzuzeigen.*

Wegen der gegenüber dem SMA-Lager erhöhten Radiotoxizität ist für das HAA-Lager zusätzlich die Robustheit gegenüber alternativen Annahmen zum Verhalten der technischen Barrieren zu untersuchen. Dazu sind für abgebrannte Brennelemente eine erhöhte Freisetzung von Radionukliden (Variation f) und für abgebrannte Brennelemente sowie für verglaste Abfälle eine frühzeitige Freisetzung von Radionukliden (Variation g) zu betrachten¹⁶:

abhängig. Für einen Vergleich der Eignung verschiedener Wirtgesteine bringt dieses Szenarium keinen sicherheitsrelevanten Erkenntnisgewinn und wird deshalb nicht verwendet.

¹³ Eine Erhöhung des Wasserflusses kann je nach betrachteter Geosphäre beispielsweise durch eine erhöhte grossräumige hydraulische Durchlässigkeit infolge von Heterogenitäten und grössere Variabilität der K-Werte, wegen einer veränderten Trennflächenstruktur oder durch eine Kombination dieser Eigenschaften zustande kommen.

¹⁴ Die Fälle a) bis g) werden einzeln berechnet (keine Kumulierung von Ungewissheiten), damit Standorte mit gutem Kenntnisstand im Vergleichsverfahren nicht zusätzlich besser bewertet werden.

¹⁵ Die in Betracht zu ziehenden Klimavarianten sind vom Betrachtungszeitraum abhängig. Die Entsorgungspflichtigen zeigen plausible Klimaentwicklungen auf. Neben dem heutigen Klima sind mindestens die radiologischen Auswirkungen bei Annahme eines eiszeitlichen Klimas und eines wärmeren und trockeneren Klimas (Bewässerung) in den provisorischen Sicherheitsanalysen zu untersuchen.

¹⁶ Dabei ist jeweils die Summe der Beiträge der abgebrannten Brennelemente, der verglasten Abfälle und der LMA zu bilden.

- f) *Berechnungen mit einer gegenüber dem Referenzfall hundertfach erhöhten Auflösungsrate der einzulagernden abgebrannten Brennelemente (Brennstoffmatrix und Brennelementhüllrohre).*
- g) *Berechnungen mit Annahme einer auf 1000 Jahre begrenzten Behälterlebensdauer¹⁷.*

5.2 Sicherheitstechnischer Vergleich anhand der Resultate des standardisierten Parametervariationsverfahrens

Für den Vergleich von Standorten¹⁸ werden die Resultate der numerischen Berechnungen herangezogen und die berechneten Dosen anhand zweier radiologischer Kriterien bewertet. Das erste Kriterium ist das in ENSI-G03 festgelegte Schutzkriterium von 0.1 mSv/Jahr, das zweite der aus der Strahlenschutzverordnung (StSV) abgeleitete Wert von 0.01 mSv/Jahr, unterhalb welchem alle Standorte als sicherheitstechnisch gleichwertig betrachtet werden. Die Festlegung eines unteren Schwellenwerts für die potenzielle jährliche Personendosis ist nach der schweizerischen Strahlenschutzgesetzgebung gerechtfertigt, da gemäss StSV auf eine weitergehende strahlenschutztechnische Optimierung verzichtet wird, falls Personen eine effektive Dosis von weniger als 0.01 mSv pro Jahr akkumulieren.

Der Vergleich zwischen möglichen Standorten wird wie folgt durchgeführt:

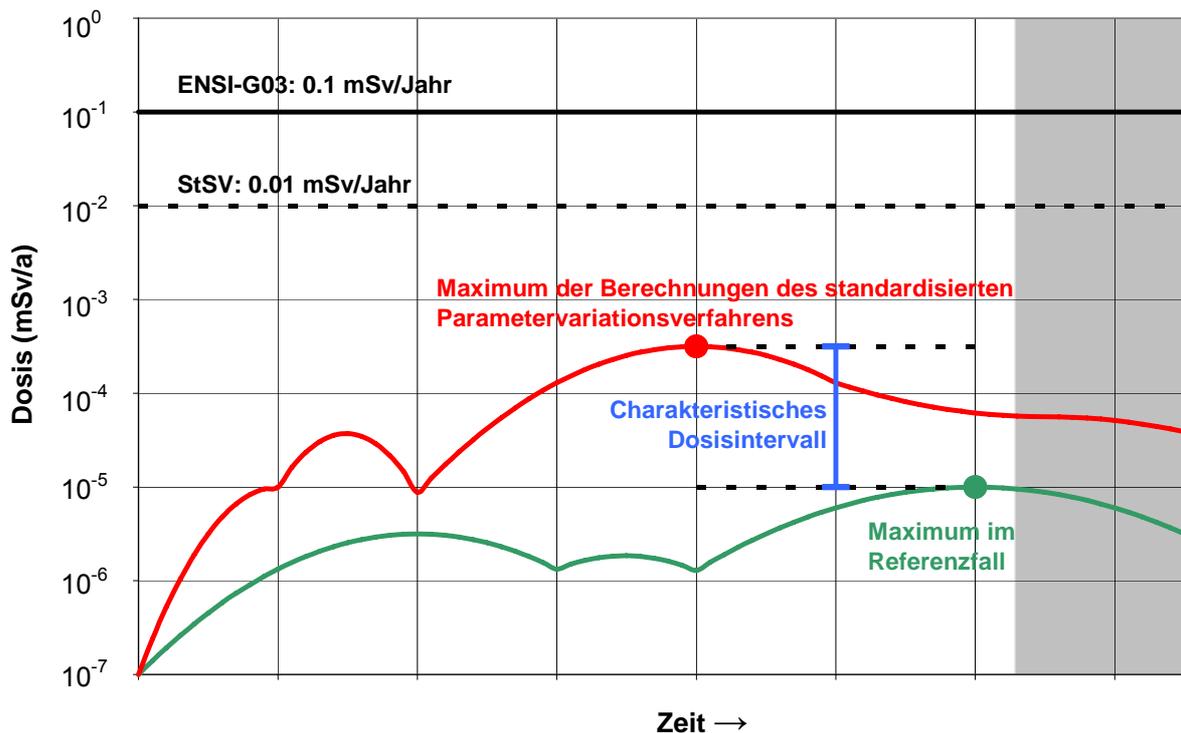
- Für jeden Standort soll mit einem Referenzszenarium im Betrachtungszeitraum (weisse Fläche in Figur 1) der zeitliche Verlauf der realistischerweise zu erwartenden Dosis berechnet werden (Referenzfall). Das Referenzszenarium beschreibt die wahrscheinliche Entwicklung des Gesamtsystems (Tiefenlager, Nahfeld, Geosphäre und Nuklidtransport bis in die Biosphäre). Die in die Modellierung eingehenden Annahmen und Parameterwerte für den Referenzfall werden von den Entsorgungspflichtigen begründet. Sie geben gemäss Stand von Wissenschaft und Technik eine realistische Situation wieder. Diese Berechnung zeigt den zeitlichen Verlauf der Personendosis (grüne Kurve in Figur 1), deren Maximum im Betrachtungszeitraum den maximalen Wert der Personendosis im Referenzfall ergibt (grüner Punkt).
- Um für das Referenzszenarium die Robustheit sowie den Einfluss von Ungewissheiten und Variabilitäten beurteilen zu können, wird das Verhalten des Tiefenlagers unter anderen Bedingungen (mindestens die Rechenfälle a) bis g) in Abschnitt 5.1) berechnet. Durch dieses Parametervariationsverfahren (die rote Kurve¹⁹ in Figur 1) wird das Maximum der Personendosis im Betrachtungszeitraum ermittelt (roter Punkt in Figur 1).
- Für jeden Standort ergibt sich daraus ein charakteristisches Dosisintervall (kurz: Dosisintervall) als Mass für seine sicherheitstechnische Eignung. Das Dosisintervall (blaues Intervall in Figur 1) erstreckt sich dabei von dem im Referenzfall berechneten maximalen Wert (grüner Punkt) bis zu dem mit dem standardisierten Parametervariationsverfahren bestimmten Maximum (roter Punkt).

¹⁷ Die Richtlinie ENSI-G03 fordert im Sinne einer Optimierung der Langzeitsicherheit, dass die Lagerbehälter für hochaktive Abfälle auf einen vollständigen Einschluss der Radionuklide während tausend Jahren ab deren Einlagerung auszulegen sind. Variation g) zeigt auf, was die radiologischen Konsequenzen sind, falls die Endlagerbehälter nach Ablauf der geforderten Einschlusszeit undicht werden.

¹⁸ Im Anhang III SGT werden die Methode und ihre Anwendung für den Vergleich von Standorten erläutert.

¹⁹ Die rote Kurve in Figur 1 wird gebildet durch die jeweiligen Maximalwerte der einzelnen Berechnungen zu jedem Zeitpunkt.

- Für die Darstellung des Systemverhaltens soll für spätere Zeiten (graue Fläche) der Verlauf der Dosen unter den im Betrachtungszeitraum verwendeten Modellvoraussetzungen bis maximal einer Million Jahre (SMA-Lager) respektive 10 Millionen Jahren (HAA-Lager) berechnet werden. Diese Berechnungen dienen dem Verständnis der Langzeitentwicklung der betrachteten Tiefenlagermodellierung. Die Darlegung der radiologischen Folgen von Freilegungsszenarien sind gemäss der Richtlinie ENSI-G03 Teil eines Sicherheitsnachweises und fliessen in die Festlegung des Betrachtungszeitraums ein. Da die berechneten Dosen von Freilegungsszenarien in erster Linie vom eingelagerten Inventar sehr langlebiger Radionuklide und nicht von der geologischen Lage des Tiefenlagers abhängen, werden Freilegungsszenarien nicht für das standardisierte Parametervariationsverfahren herangezogen.

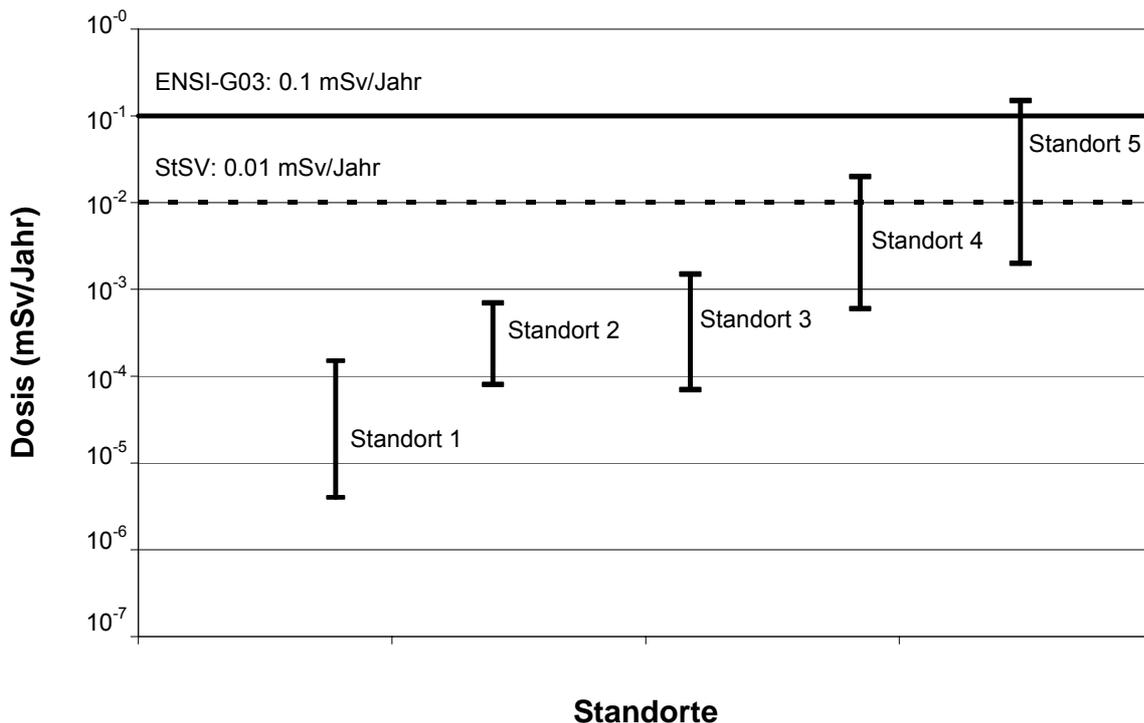


Figur 1: Ermittlung des im sicherheitstechnischen Vergleich verwendeten charakteristischen Dosisintervalls für einen Tiefenlagerstandort: Der zeitliche Verlauf der berechneten Dosen wird bis zum Ende des Betrachtungszeitraums (weisse Fläche) für den Referenzfall (grüne Kurve) und für die mit dem standardisierten Parametervariationsverfahren erhaltenen Resultate (rote Kurve) ermittelt. Die jeweiligen Dosismaxima (Punkte) legen das charakteristische Dosisintervall fest. Für die Darstellung des Systemverhaltens soll für Zeiten nach dem Betrachtungszeitraum (graue Fläche) der Verlauf der Dosen unter den im Betrachtungszeitraum verwendeten Modellvoraussetzungen bis maximal 1 Million Jahre (SMA) und 10 Millionen Jahre (HAA) berechnet werden. Anmerkung: Die eingezeichneten Dosiskurven sind hypothetische Beispiele.

Berücksichtigt werden nur Standorte, deren Dosisintervalle vollständig unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr liegen. Diese Standorte werden als sicherheitstechnisch geeignet eingestuft. Die übrigen Standorte scheiden aus.

Keine sicherheitstechnische Unterscheidung zwischen Standorten wird vorgenommen, falls ihre Dosisintervalle vollständig unterhalb von 0.01 mSv/Jahr liegen. Diese Standorte werden als sicherheitstechnisch gleichwertig betrachtet.

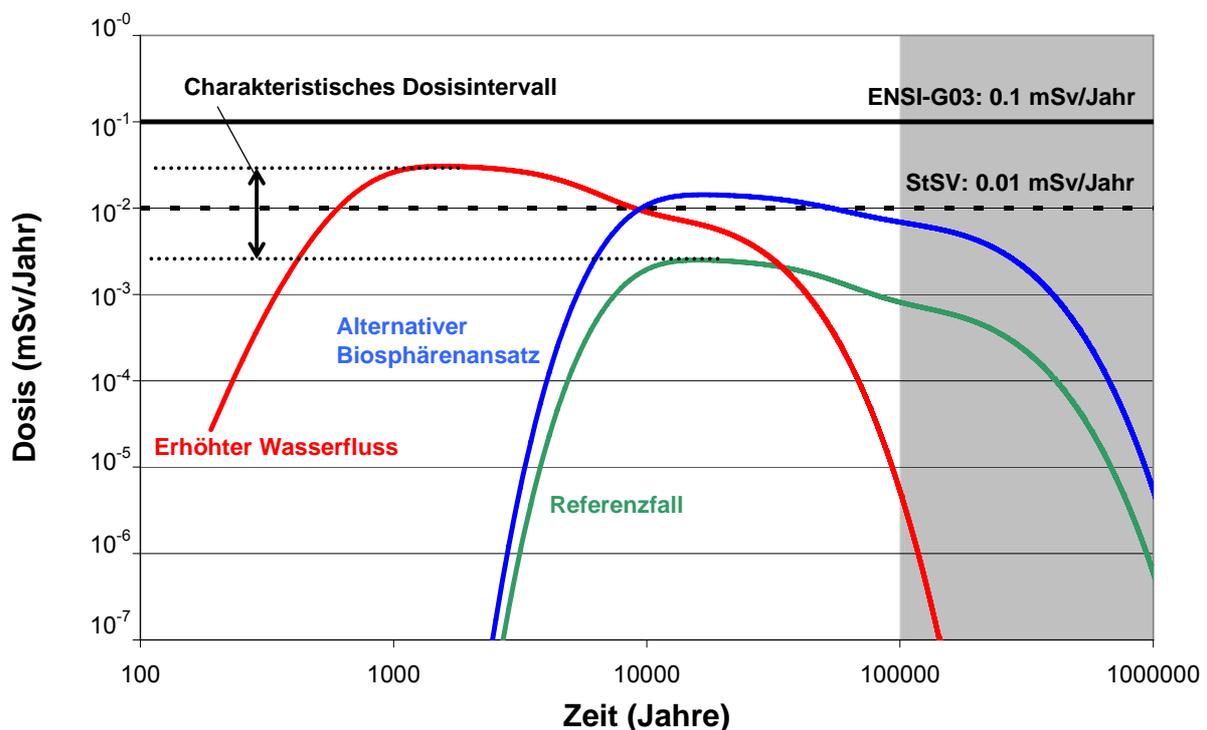
Ein Standort, bei dem ein Teil des Dosisintervalls zwischen 0.01 und 0.1 mSv/Jahr liegt, bleibt im Standortwahlverfahren, falls sein Dosisintervall mit dem Dosisintervall des Standorts mit dem kleinsten Dosismaximum im Referenzfall (Standort 1 in Figur 2) überlappt. Dieses Vergleichskriterium des Dosisintervalls wird verwendet, damit ein möglicherweise geeigneter Standort nicht aufgrund einer allenfalls noch unvollständigen Datengrundlage frühzeitig aus dem Verfahren ausscheidet.



Figur 2: Dosisintervalle der provisorischen Sicherheitsanalysen für fünf hypothetische Standorte (die in verschiedenen Wirtgesteinen liegen können). Jeder Standort wird mit dem radiologisch besten Standort (Standort mit tiefster Dosis im Referenzfall, im Beispiel Standort 1) verglichen. In diesem Beispiel scheidet Standort 5 aus, da der obere Wert des Dosisintervalls über dem Schutzkriterium der Richtlinie ENSI-G03 von 0.1 mSv/Jahr liegt. Standorte 1, 2, 3 und 4 sind sicherheitstechnisch geeignet, da ihre Dosisintervalle unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr liegen. Standorte 1, 2 und 3 gelten ausserdem als sicherheitstechnisch gleichwertig, da ihre Dosisintervalle vollständig unter dem Schwellenwert von 0.01 mSv/Jahr liegen. Standort 4 wird für weitere Verfahrensschritte ausgeschlossen, da sein Dosisintervall nicht mit demjenigen des besten Standorts (Standort 1) überlappt und über 0.01 mSv/Jahr hinausgeht.

5.3 Beispielhafte Anwendung des standardisierten Parametervariationsverfahrens

Als Beispiel für das Vorgehen bei der Anwendung des standardisierten Parametervariationsverfahrens sind in Figur 3 die Resultate der Dosisberechnungen des ENSI für ein generisches SMA-Lager gezeigt. Das charakteristische Dosisintervall wird durch das innerhalb des Betrachtungszeitraums berechnete Maximum für den Referenzfall und dasjenige für die Parametervariation bestimmt. Es umspannt mehr als eine Grössenordnung: Im Referenzfall erhält man eine maximale Dosis von $2 \cdot 10^{-3}$ mSv/Jahr nach rund 20'000 Jahren. Das Maximum der Parametervariation beträgt $3 \cdot 10^{-2}$ mSv/Jahr und ist durch die Parametervariation *zehnfach erhöhter Wasserfluss* bestimmt. Es tritt nach rund 2000 Jahren ein. Die Grösse des charakteristischen Dosisintervalls dient als Mass für die radiologische Robustheit des Tiefenlagers.



Figur 3: Beispielhafte Dosisberechnungen des ENSI zur Illustration der standardisierten Parametervariationsverfahren für ein generisches SMA-Lager. Zur Verbesserung der Anschaulichkeit wurden nur folgende Fälle betrachtet: der Referenzfall (grüne Kurve), eine Variation mit erhöhtem Wasserfluss (rote Kurve) und eine Variation mit einem alternativen Biosphären-Ansatz (blaue Kurve). Die behördlichen Vergleichskriterien, das Schutzkriterium der Richtlinie ENSI-G03 von 0.1 mSv/Jahr (schwarze Linie), der aus der StSV abgeleitete Wert von 0.01 mSv/Jahr (schwarz gestrichelte Linie), der Betrachtungszeitraum (weisse Fläche) und das charakteristische Dosisintervall (Doppelpfeil, Bereich zwischen den punktierten schwarzen Linien) sind eingezeichnet. Innerhalb der grauen Fläche sind die für die Darstellung des Systemverhaltens berechneten Dosen für Zeiten nach dem Betrachtungszeitraum dargestellt.

Dieses Vorgehen gibt zudem eine Übersicht über die für die maximale Dosis massgebenden Parametervariationen. Im Beispiel ist dies für Zeiten kleiner als 10'000 Jahre die Freisetzung von ^{36}Cl bei Annahme eines erhöhten Wasserflusses in einem homogen-porösen Medium. Für Zeiten grösser als 10'000 Jahre werden die maximalen radiologischen Auswirkungen bei Annahme einer alternativen Biosphäre erreicht. Da das Dosisintervall in diesem Beispiel vollständig unterhalb des in ENSI-G03 definierten Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr liegt, würde

dieser Standort mit der im SGT beschriebenen Vergleichsmethode für die numerischen Berechnungen als sicherheitstechnisch geeignet eingestuft werden. Da in diesem Beispiel das charakteristische Dosisintervall nicht vollständig unterhalb von 0.01 mSv/Jahr liegt, gälte er sicherheitstechnisch als *nicht* gleichwertig mit allen anderen Standorten, deren Dosisintervalle vollständig unterhalb von 0.01 mSv/Jahr liegen.

6 Dokumentation der provisorischen Sicherheitsanalysen und des sicherheitstechnischen Vergleichs in Etappe 2 des SGT

In Figur 4 ist schematisch die sicherheitstechnische Dokumentation für die Standortauswahl in Etappe 2 gezeigt. Für jeden Standort und jeden Lagertyp wird dazu eine provisorische Sicherheitsanalyse durchgeführt.

Provisorische Sicherheitsanalysen

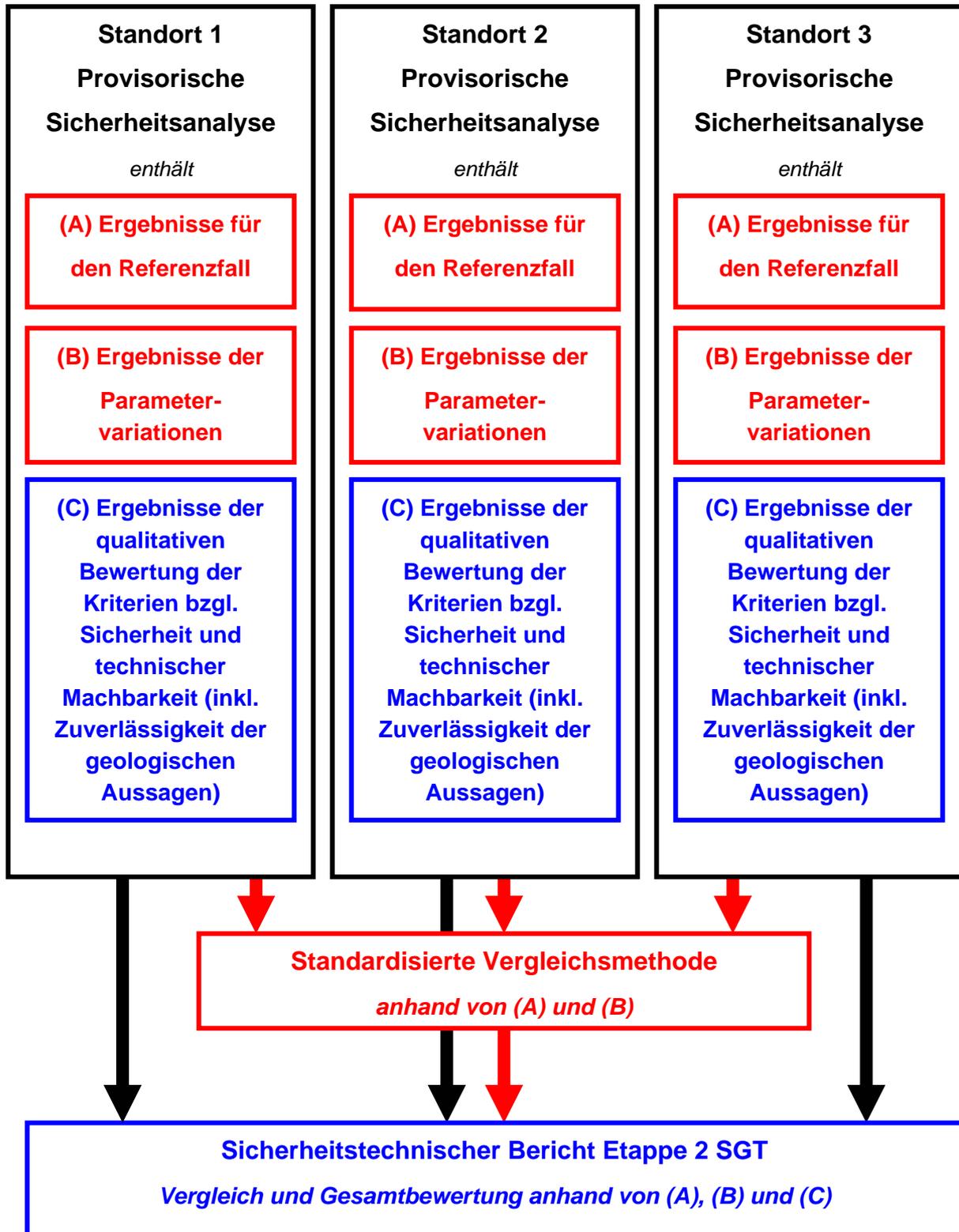
In den provisorischen Sicherheitsanalysen enthalten ist jeweils ein Referenzszenarium mit Diskussion der dazugehörigen Prozesse, Parameter und deren Ungewissheiten. Als Teil der provisorischen Sicherheitsanalysen sind der Referenzfall sowie die standardisierten Parametervariationen dokumentiert, die für die standardisierte Vergleichsmethode verwendet werden, sowie die Resultate der qualitativen Bewertung der Kriterien gemäss Tabelle 1 SGT.

Sicherheitstechnischer Bericht in Etappe 2

Im sicherheitstechnischen Bericht der Etappe 2 werden die Ergebnisse der einzelnen provisorischen Sicherheitsanalysen, der standardisierten Vergleichsmethode und der qualitativen Bewertung der Kriterien (Tabelle 1) für alle Standorte zusammengefasst und gesamthaft bewertet.

Die Diskussion der Sicherheitsfunktionen der geologischen Barriere und die qualitative Bewertung der Kriterien werden beim Vergleich der Standorte im sicherheitstechnischen Bericht berücksichtigt. Die Bewertung beinhaltet unter anderem die Eigenschaften der geologischen Barrieren bezüglich Wasserfluss (Heterogenitäten, Trennflächen), den Gastransport und den Radionuklidtransport (Fliessgeometrie, Sorptionseigenschaften), die mechanische und thermische Stabilität, das Selbstabdichtungsvermögen und das chemische Milieu.

Zusammen mit weiteren Berichten zu raumplanerischen Aspekten, Voruntersuchungen zur Umweltverträglichkeitsprüfung und sozioökonomischen Wirkungsstudien bildet der sicherheitstechnische Bericht die Grundlage für die Standortvorschläge durch die Entsorgungspflichtigen.



Figur 4:

Schematische Darstellung der sicherheitstechnischen Dokumentation in Etappe 2 SGT: Für jeden Standort mit dem betrachteten Lagertyp ist eine provisorische Sicherheitsanalyse zu erstellen. Der Vergleich der Standorte und die Gesamtbewertung für jeden Lagertyp ist in einem sicherheitstechnischen Bericht zur Etappe 2 zu dokumentieren.

7 Begriffsbestimmungen

In diesem Bericht bedeuten:

Belastbare Aussage	Aussage, die auch unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilitäten und Ungewissheiten in Daten und Prozessen gültig ist.
Betrachtungszeitraum	Der Zeitraum, für den in der provisorischen Sicherheitsanalyse die Einhaltung der Schutzkriterien quantitativ aufzuzeigen ist, richtet sich nach dem radiologischen Gefährdungspotenzial der Abfälle. Falls gezeigt werden kann, dass durch das geologische Tiefenlager aufgrund des radiologischen Gefährdungspotenzials der Abfälle bereits nach weniger als einer Million Jahre nur noch vernachlässigbar kleine radiologische Auswirkungen für Mensch und Umwelt zu erwarten sind, kann der Nachweis für kürzere Zeiträume geführt werden.
Biosphärenmodell	Transport- und Expositionsmodell zur Umrechnung von Radionuklidfreisetzungen aus der Geosphäre in die Biosphäre in eine Strahlenexposition für die zu betrachtende Bevölkerungsgruppe (hier Individualdosis). Grundlage bildet ein Transport- und Akkumulationsmodell für die Berechnung der Radionuklid Ausbreitung im menschlichen Lebensraum (Wasser, Luft, Boden) und ein Modell für die Berechnung der Strahlendosis unter Berücksichtigung der Radionuklid Aufnahme über das Trinkwasser, die Nahrung und die Atemluft sowie unter Berücksichtigung der direkten Bestrahlung.
Dosis	Mass für die Beurteilung des gesundheitlichen Risikos durch ionisierende Strahlung. In diesem Bericht ist die effektive Dosis gemeint: Summe der mit den Wichtungsfaktoren w_T gewichteten Äquivalentdosen in allen Organen und Geweben. Die Einheit der Dosis ist das Sievert (Sv).
Geologische Barriere	Natürliches Umfeld eines geologischen Tiefenlagers, das gemäss Sicherheitskonzept passiv wirkend zur Rückhaltung der Radionuklide beiträgt.
Konservative Annahme	Annahmen werden als konservativ bezeichnet, wenn sie dazu führen, dass die radiologischen Auswirkungen mit hoher Wahrscheinlichkeit überschätzt werden. Konservative Annahmen stellen oft Vereinfachungen eines Sachverhalts dar, die zum Zweck der Überbrückung von Daten- oder Verständnislücken eingesetzt werden können.
Langzeitsicherheit	Sicherheit für Mensch und Umwelt nach Verschluss eines geologischen Tiefenlagers.

Mehrfachbarrierensystem	Ein System von gestaffelten, passiv wirkenden, verschiedenartigen technischen und natürlichen Barrieren zum Einschluss und zur Rückhaltung der im Abfall enthaltenen Radionuklide. Die Wirksamkeit des Mehrfachbarrierensystems darf nicht hauptsächlich von der Wirksamkeit einer einzelnen Barriere abhängig sein.
Optimierung	Für ein geologisches Tiefenlager wird die Optimierung als ein schrittweiser Prozess verstanden, indem bei jeder sicherheitsrelevanten Entscheidung verschiedene Alternativen und ihre Bedeutung für die Sicherheit im Betrieb und für die Langzeitsicherheit in qualitativer Weise betrachtet werden und ein insgesamt für die Sicherheit günstiger Entscheid gefällt wird.
Referenzfall	Beschreibt im Rahmen des Referenzszenariums die Wirkung der technischen und natürlichen Barrieren. Das Rückhaltevermögen des Barrierensystems wird unter Verwendung von Referenzwerten für die Berechnungen aufgezeigt.
Referenzszenarium	Erwartete Variante der Entwicklung des Tiefenlagerssystems (Abfallinventar, Barrierensystem, geologische Situation), der Biosphäre und der menschlichen Lebensweise.
Robustheit	Eigenschaft des betrachteten Systems, gegenüber Ungewissheiten, Vorgängen und Ereignissen wenig empfindlich zu sein.
Sensitivitätsanalyse	Untersucht die Änderung der Modellergebnisse auf veränderte Eingabewerte und dient dazu, die für die Sicherheit massgebenden Parameter zu identifizieren.
Sicherheitsanalyse	Systematische Untersuchung mit dem Ziel, die Erfüllung der vorgegebenen Sicherheitsanforderungen aufzuzeigen.
Szenarium	Mögliche Variante der Entwicklung der Abfälle, der technischen und natürlichen Barrieren in und um ein Tiefenlager, der Biosphäre und der menschlichen Lebensweisen unter Einwirkung von angenommenen Eigenschaften, Ereignissen und Vorgängen.
Technische Barriere	Technische Komponente in einem geologischen Tiefenlager, die über den Verschluss hinaus verbleibt und gemäss Sicherheitskonzept passiv wirkend zur Rückhaltung der Radionuklide beiträgt.
Überwachung	Eine über längere Zeit kontinuierliche oder periodisch wiederholte Beobachtung einer Eigenschaft oder Messung einer Kenngrösse oder die Summe aller solcher Beobachtungen und Messungen.

Umhüllende Varianten	Entwicklungsvarianten der Abfälle, der technischen und natürlichen Barrieren in und um ein Tiefenlager, der Biosphäre und der menschlichen Lebensweisen, deren radiologische Auswirkungen in den betrachteten Zeiträumen mit hoher Wahrscheinlichkeit grösser sind als jene des zukünftigen, tatsächlichen Entwicklungsverlaufs.
Verfüllung	Schliessung von Hohlräumen durch Einbringen von Feststoffen. Die Verfüllung dient der mechanischen Stabilisierung, räumlichen Abtrennung oder Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit der natürlichen und technischen Barrieren.
Zugangsbauwerke	Zugänge zu den untertägigen Bauwerken des Tiefenlagers.

ENSI 33/075

Herausgeber: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), CH-5200 Brugg
Telefon +41(0)56 460 84 00, Telefax +41(0)56 460 84 99

Zu beziehen bei: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Informationsdienst, Industriestrasse 19, CH-5200 Brugg
oder per E-Mail Infodienst@ensi.ch
Abrufbar unter www.ensi.ch